

**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ВОДОРОДОМ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ
ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ СТАЛИ, ДЕФОРМИРОВАННОЙ МЕТОДОМ КРУЧЕНИЯ ПОД
ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ**

Г.Г. Майер¹, Е.В. Мельников¹, В.А. Москвина^{1,2}

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. Е.Г. Астафурова¹

¹ ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: galinazg@yandex.ru

**INFLUENCE OF HYDROGEN ALLOYING ON STRUCTURE AND MICROHARDNESS OF HIGH-
NITROGEN STEEL DEFORMED BY HIGH-PRESSURE TORSION**

G.G. Maier¹, E.V. Melnikov¹, V.A. Moskvina^{1,2}

Scientific Supervisor: assistant professor, Dr. E.G. Astafurova¹

¹ Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russia, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4, 634055

² Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: galinazg@yandex.ru

Abstract. *The influence of hydrogen alloying on microstructure and microhardness of high-nitrogen Fe-19Cr-21Mn-1.3V-0.8N-0.3C wt. % steel produced by high-pressure torsion (HPT) was investigated. Examination of X-rays diffraction data indicates that hydrogenation of HPT-processed specimens leads to a broadening of X-rays lines and their shifting as result of stacking-faults formation and high residual stresses. Hydrogenation of HPT-processed steel promotes to gamma-epsilon martensitic transformation. Due to hydrogen-induced phase hardening, the microhardness of the steel increases from 6.5 GPa in hydrogen-free state to 6.8 GPa in hydrogen-charged one. After exposure for 170 h. at air condition, the position of X-rays lines became close to one for state after HPT without hydrogen-charging due to release of hydrogen atoms.*

Введение. Проблемы, связанные с присутствием водорода в металлах и сплавах, постоянно находятся в центре внимания широкого круга исследователей. Водород способен оказывать сильное влияние на физико-химические свойства материалов и является, в частности, одной из важнейших причин ухудшения эксплуатационных характеристик сталей. Вопросы взаимодействия водорода с ультрамелкозернистыми структурами, сформированными в сталях методами интенсивной пластической деформации, становятся все более актуальными в связи с возрастающей необходимостью снижения массы и повышения прочностных характеристик конструкций и ответственных деталей, работающих в среде водорода [1-4]. Формирование ультрамелкозернистого состояния сопровождается увеличением доли границ зерен, которые выступают местами преимущественного накопления водорода. В результате этого концентрация накопленного водорода в ультрамелкозернистых материалах превышает концентрацию в крупнокристаллических аналогах и возможно усиление эффекта водородной хрупкости. Ввиду ограниченного числа работ по представленной теме, для решения проблемы взаимодействия

водорода с аустенитными сталями с ультрамелкозернистой структурой необходимы детальные исследования их микроструктуры и механических свойств.

Материалы и методика исследования. В качестве объекта исследования была выбрана высокоазотистая аустенитная сталь Fe-19Cr-21Mn-1.3V-0.8N-0.3C (мас.%). Исходное состояние стали получали закалкой в воду после выдержки при $T=1200^{\circ}\text{C}$ в течение 1 часа. После закалки сталь имела структуру преимущественно аустенита (параметр решетки составлял 0,363 нм) с карбонитридами хрома и ванадия. Стальные диски диаметром 10 мм подвергали кручению под давлением (КВД) при комнатной температуре, давлении 6 ГПа, на $N=1$ оборот. После КВД проводили электролитическое насыщение стальных образцов водородом в 3%-ном водном растворе NaCl с добавлением NH_4SCN при комнатной температуре, плотности тока 10 мА/см^2 и продолжительности наводороживания 15 ч.

Микротвердость стали измеряли на микротвердомере Duramin 5 с нагрузкой $P=200$ г. Среднее значение вычисляли по измерениям, проведенным на середине радиуса дисков. Рентгеновские исследования выполняли на дифрактометре Shimadzu XRD-6000 с использованием Cu K α излучения.

Экспериментальные результаты. КВД стали вызывает уменьшение интенсивности, уширение и смещение рентгеновских линий относительно исходных положений до деформации. Характер рентгенограмм указывает на формирование разориентированной поликристаллической структуры при КВД. После деформации стали на рентгенограммах наблюдали отражения, соответствующие аустениту и карбонитридам (Cr,V)(C,N). Насыщение деформированных образцов водородом сопровождается снижением интенсивности, уширением рентгеновских пиков в сравнении с состоянием после КВД, что свидетельствует о росте внутренних напряжений в структуре стали (рис.1). Обнаруженное смещение рентгеновских линий $(111)_{\gamma}$ в область меньших углов после наводороживания исследуемой стали указывает на рост концентрации дефектов упаковки и увеличение остаточных напряжений (Табл.1) при легировании стали водородом. После наводороживания на рентгенограммах наблюдали линии, межплоскостные расстояния которых соответствуют γ -фазе, карбонитридам ванадия и ϵ -фазе. То есть легирование водородом способствует увеличению доли ϵ -фазы в структуре стали по сравнению с деформированным состоянием.

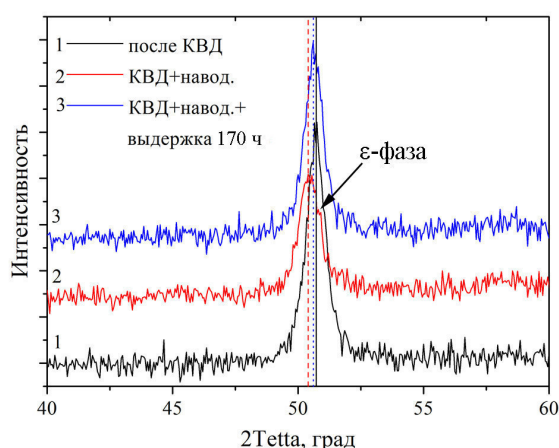


Рис. 1. Фрагменты рентгенограмм исследуемой стали в состоянии: 1) после КВД; 2) после КВД и последующего наводороживания; 3) после КВД, последующего наводороживания и выдержки в течение 170 часов на воздухе

Выдержка на воздухе наводороженных образцов в течение 170 часов сопровождается ростом интенсивности, уменьшением ширины рентгеновских пиков, смещением рентгеновских линий в область больших углов и ростом значений ОКР в сравнении с состоянием после КВД и наводороживания. Это

указывает на частичную релаксацию и $\epsilon \rightarrow \gamma$ фазовый переход в результате выхода водорода из структуры стали в процессе выдержки образцов на воздухе.

Таблица 1

Влияние КВД и последующего наводороживания на положение (2θ), ширину (FWHM), интенсивность (I) рентгеновских максимумов (111), значения областей когерентного рассеяния (ОКР) и микродеформации кристаллической решетки ($\Delta d/d$)

Состояние	2θ , градусы	FWHM	$I/I_{\text{КВД}}$	ОКР, нм	$\Delta d/d, 10^{-3}$
КВД	50,7078	0,9956	1	20.83	5,0
КВД+наводороживание	50,4586	1,0518	0,48	22.94	6,6
КВД+наводороживание+ выдержка в течении 170 ч	50,6638	1,0049	0,51	47.54	6,7

После КВД сталь обладает высокими значениями микротвердости – 6.5 ГПа, распределение микротвердости по диаметру дисков после КВД квазигоднородное. Наводороживание деформированных образцов приводит к повышению значений микротвердости до 6.8 ГПа, а последующая выдержка на воздухе сопровождается спадом значений до 6.4 ГПа. Связанное с легированием водородом повышение микротвердости образцов обусловлено фазовым наклепом за счет реализации $\gamma \rightarrow \epsilon$ мартенситного превращения, а также ростом внутренних напряжений. Понижение микротвердости после выдержки в образцах связано с обратным $\epsilon \rightarrow \gamma$ превращением и релаксацией напряжений из-за выхода водорода.

Заключение. Электролитическое насыщение водородом высокоазотистой аустенитной стали Fe-19Cr-21Mn-1.3V-0.8N-0.3C (мас.%) в ультрамелкозернистом состоянии, полученном методом кручения под высоким давлением, приводит к уширению, уменьшению интенсивности и смещению рентгеновских линий (111) $_{\gamma}$ в область меньших углов, а также появлению отражений от ϵ -фазы. После наводороживания происходит увеличение микротвердости стали, связанное с индуцированным водородом фазовым наклепом и увеличением внутренних напряжений. Связанные с наводороживанием эффекты упрочнения исчезают после выдержки наводороженных образцов на воздухе.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента РФ (СП-160.2016.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mine Y., Tsumagaria T., Horita Z. Hydrogen trapping on lattice defects produced by high-pressure torsion in Fe-0.01 mass% C alloy // Scripta Materialia – 2010 – V.63 – pp.552–555.
2. Mine Y., Horita N., Horita Z., Takashima K. Effect of ultrafine grain refinement on hydrogen embrittlement of metastable austenitic stainless steel // International journal of hydrogen energy–2017–V.42 – pp. 15415-15425.
3. Nie Y., Kimura Y., Inoue T., Yin F., Akiyama E., Tsuzaki K. Hydrogen Embrittlement of a 1500-MPa Tensile Strength Level Steel with an Ultrafine Elongated Grain Structure // Metallurgical and Materials Transactions A – 2012 – V. 43a – pp.1670-1687.
4. Tsay L.W., Lu H.L., Chen C. The effect of grain size and aging on hydrogen embrittlement of a maraging steel // Corrosion Science – 2008 – V.50 – pp.2506–2511.